

Mesh 스크린을 이용한 충돌제트 열전달 제어에 관한 연구

조정원* · 이상준**

Control of Impinging Jet Heat Transfer with Mesh Screens

Joung-Won Cho, Sang-Joon Lee

Key Words : Impinging Jet(충돌분류), Heat Transfer(열전달), Solidity Ratio(차폐율), Turbulent Intensity(난류강도)

Abstract

The local heat transfer rate of an axisymmetric submerged air jet impinging on normal to a heated flat plate was investigated experimentally with varying solidity of mesh screen. The mean velocity and turbulent intensity profiles of streamwise velocity component were measured using a hot-wire anemometry. The temperature distribution on the heated flat surface was measured with thermocouples. The screen installed in front of the nozzle exit(behind of 35mm) modify the jet flow structure and local heat transfer characteristics. For higher solidity screen, turbulence intensity at core region is high and increases the local heat transfer rate at nozzle-to-plate spacings($L/D < 6$). For larger nozzle-to-plate spacings($L/D > 6$), however, the turbulent intensities of all screens tested in this study approach to an asymptotic curve, but the small mean velocity at the core region reduces the local heat transfer rate for high solidity screens.

기호설명

Roman Symbols

A	area of gold-coated film (heating area)
D	nozzle exit diameter
f	nonuniformity factor of gold coating
h	local heat transfer coefficient, equation (1)
I	electric current across the gold-coated film
k	thermal conductivity of air
L	distance between nozzle-to-plate
L/D	dimensionless nozzle-to-plate spacing
Nu	local Nusselt number, equation (1)
q_c	conduction heat flux
q_r	radiation heat flux
q_v	convection heat flux, equation (2)
R	radial distance from the stagnation point
R/D	dimensionless radial distance
Re	Reynolds number based on the nozzle exit diameter, UD/ν
T_a	ambient temperature
T_j	jet temperature

T_w	local wall temperature (heated flat plate)
Tu	streamwise turbulence intensity
U	mean velocity at nozzle exit
V	voltage across the gold-coated film

Greek Symbols

ϵ	emissivity of the test flat plate on the gold coated film
σ	Stefan-Boltzmann constant
σ_s	solidity ratio of screen
ν	kinematic viscosity of air

1. 서론

충돌분류 열전달에 관한 연구는 그 학문적 관심 뿐만 아니라 넓은 공업적 응용 분야를 가지고 있다. 충돌분류는 충돌면에서 높은 열 및 물질 전달율을 갖으며 주로 냉각, 건조 공정 등에서 널리 사용되어져 왔다. 예를 들어 제철 공정에서의 냉각, 유리의 템퍼링, 터어빈 블레이드의 냉각, 종이와 필름의 건조 등에 이용되어져 왔다. 본 연구에

* 포항공과대학교 대학원 기계공학과

** 정회원, 포항공과대학교 기계공학과

서는 스크린의 차폐율을 변화시켜 충돌분류의 유동구조를 변화시킴으로써 전열특성에 미치는 효과를 관찰하고자 한다.

Baines & Peterson^[1]은 격자(lattices) 스크린을 지나는 유동에 대한 연구에서 차폐율이 0.5 이상이면 후류의 속도분포가 불안정해지며 차폐율에 따라 속도의 변동성분이 달라짐을 밝혔다.

Rose^[2]는 동일한 차폐율($\sigma_s \approx 0.34$)을 갖는 몇 가지 다른 grid mesh size(1/24~2in)의 스크린에 대한 연구에서 mesh size가 증가할수록 난류성분이 증가함을 밝혔다.

Laws & Livesey^[3]는 스크린 주위 유동에 대한 연구에서 차폐율, $\sigma_s = 0.3\sim 0.4$ 이며 coarse mesh를 갖는 격자형의 스크린은 난류를 발생시키는 가장 쉬운 방법임을 보여주었다. 또한 낮은 Reynolds 수에서 매우 가는 mesh의 스크린을 사용하면 난류강도성분이 빠르게 감소하며, 이와는 반대로 높은 Reynolds 수에서 coarser mesh, higher solidity의 스크린을 사용하면 난류강도가 증가함을 밝혔다.

Groth & Johansson^[4]은 다양한 범위의 mesh size의 스크린을 사용하여 난류성분 변화를 연구를 하였다. 그들은 square rod grid 스크린에 바로 근접한 영역에서 highly anisotropy한 난류구조를 가지며 격자(grid)에서 20mesh width 떨어진 거리에서는 isotropic한 유동구조를 가짐을 밝혔다.

격자 뒤에서 발생하는 난류는 어느 정도 후류 영역까지 anisotropy를 유지한다고 알려져 있다. 예를 들어, Comie-Beliot & Corrsin(1966)은 400mesh width 이상의 거리까지 V_{rms}/U_{rms} 이 0.9보다 조금 높은 값을 가진다고 하였으며, Grant & Nisbet(1957)과 Kistler & Vrebalovich(1966)은 0.8 근방임을 보고 하였다.

충돌분류 열전달에 관한 기존연구에서 유동구조 변화의 영향이 중요함에도 불구하고, 이를 이용한 열전달 향상 연구는 많이 이루어지지 않았다. 평판에서의 열전달은 난류강도 변화에 따라 달라지게 되므로 차폐율이 다른 스크린으로 난류강도를 변화시켜 충돌면에서의 전열특성을 향상 시키고자 하는 것이 본 연구의 주된 목적이다.

2. 실험장치 및 방법

충돌분류 실험장치의 전체적인 구성도를 Fig. 1에 나타내었다. 축류형 송풍기로부터 공급된 공기는 honeycomb, 열 교환기, 스크린, 그리고 유량계를 거쳐서 긴 파이프에 연결된다.

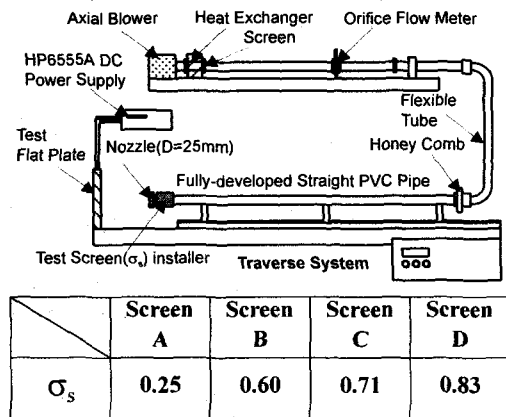


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

파이프는 내경이 52.3mm, 두께 4mm, 길이가 250cm인 PVC 재질로 되어있다. 서로 다른 네 가지의 차폐율을 갖는 스크린을 긴 PVC 파이프 끝에 부착하였다. 여기서 차폐율(solidity, σ_s)은 단위 면적당 투영 입체면적으로 정의된다. 공기제트의 온도를 측정하기 위해서 반경 0.25mm의 보정(calibration)된 T형 열전대를 노즐 출구로부터 상류쪽으로 170mm 위치에 유동에 방해를 주지 않도록 부착하였다. 주변 온도(ambient temperature)를 측정하기 위하여 자유흐름 영역에도 동일한 열전대를 설치하였다. 이들 열전대들은 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 의 오차 범위를 갖는 HP3852A 데이터 획득장치에 연결되어 있다. 풍량은 축류형 송풍기에 연결된 DC 모터 제어를 통해 제어되고 $\pm 2\%$ 의 섭동오차를 갖는 유량계(FL1659)로 유량을 측정하였다. 전체 파이프 시스템은 0.01mm의 정확도를 가지고 노즐과 가열관 사이의 거리를 최대 100cm까지 조절할 수 있는 이송장치에 지지 되어 있다. 축류형 송풍기에서 발생하는 열량을 제어할 수 있는 냉각장치로써 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 의 정확도를 갖는 Neslab RTE221 항온조로써 분류온도의 온도를 제어하여 분출된 제트와 주변공기와의 온도차를 $\pm 0.02^\circ\text{C}$ 이 내가 되도록 하였다.

충돌분류의 열전달 측정에 이용된 평판은 Plexiglas와 그 판 상면에 부착되어지는 gold-coated film Intrex, 33개의 열전대(Thermocouple)로 구성되어진다. 충돌면은 가로 30.5cm, 세로 30.5cm, 두께 1.27cm로 강화 폴리에스테르 판(Plexiglas plate)으로 되어있다. 이 판의 표면에는 세로 40mm, 가로 120mm, 두께 0.13mm의 gold-coated film을 spray glue를 이용하여 접착시켰고, 이 gold-coated film Intrex에 직류 전류를 가해줌으로써

균일 벽면 열 유속(uniform wall heat flux) 경계조건을 만들 수 있었다. 전극으로는 얇은 구리 테이프를 사용하여 Intrex 표면에 붙였고, 구리 전극과 Intrex 표면 사이의 접촉저항을 줄이기 위해 silver-loaded paint를 칠하였다. 구리전극은 50mV, 5 Amp 용량의 차단 저항기(shunt register)와 HP6555A 직류 전원 공급기에 연결되어 있고, 두 대의 Fluke 8840A 전압계로써 Intrex 사이의 전압강하와 Intrex에 가해지는 전류를 측정하였다. 국소 열전달계수는 다음과 같은 식을 이용하여 구하였다.

$$h = \frac{q_w}{(T_w - T_f)}, \quad Nu = \frac{hD}{k} \quad (1)$$

$$q_w = \frac{fIV}{A} - q_r - q_c = \frac{fIV}{A} - \epsilon\sigma(T_w^4 - T_a^4) \quad (2)$$

여기서 h 는 국소 대류열전달 계수이며, T_w 는 벽면 온도, T_f 는 제트온도 그리고 T_a 는 제트주위온도를 나타낸다. 대류 열유속(convection heat flux, q_w)은 직류 전원공급기로 공급된 열유속에서 벽면으로의 전도 열유속(conduction heat flux, q_c)과 Stefan-Boltzmann의 식으로부터 계산되어지는 복사 열유속(radiation heat flux, q_r)을 제외한 열 유속을 의미한다.

스크린을 지나는 충돌분류유동을 조사하기 위하여 I형 열선 프로우브(DANTEC 55P11)를 이동장치로 이동시키면서 유속을 측정하였다. 열선 프로우브를 정온형 열선유속계(TSI IFA-100)에 연결하여 나온 전압신호는 먼저 저역필터를 거치도록 하였다. 열선유속계에서 나온 아날로그 속도신호를 데이터 취득장치(DT-2838)를 이용하여 초당 2000개 비율로 취득하였다. 열선유속계로 측정한 전압신호(E)는 다음과 같은 King's law를 사용하여 실제 속도(U)로 보정하였다.

$$E^2 = A + B \cdot U^n \quad (3)$$

여기서 지수 n 은 일반적으로 통용되는 값인 0.45를 사용하였다. 이렇게 구한 데이터를 통계처리하여 각 지점에서의 평균속도와 난류강도를 구하였다. 실험중 시험부 주위 온도를 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 이내로 일정하게 유지시켜 온도차에 기인한 속도측정 오차를 최소화시켰다.

3. 결과 및 토의

본 실험은 서로 다른 다공도를 갖는 4 가지 스크린에 대하여 상온 25°C 에서 제트유량을 레이놀

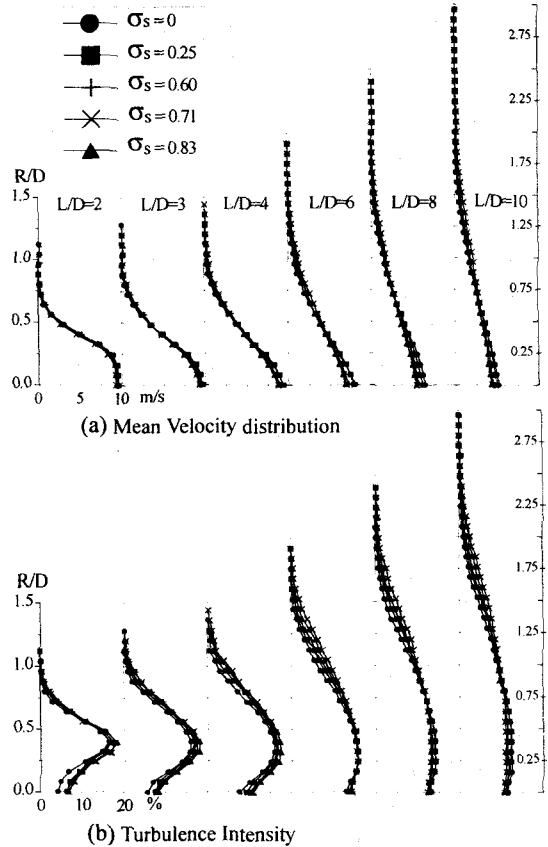


Fig. 2 Velocity and turbulence intensity profiles measured at downstream after jet impingement.

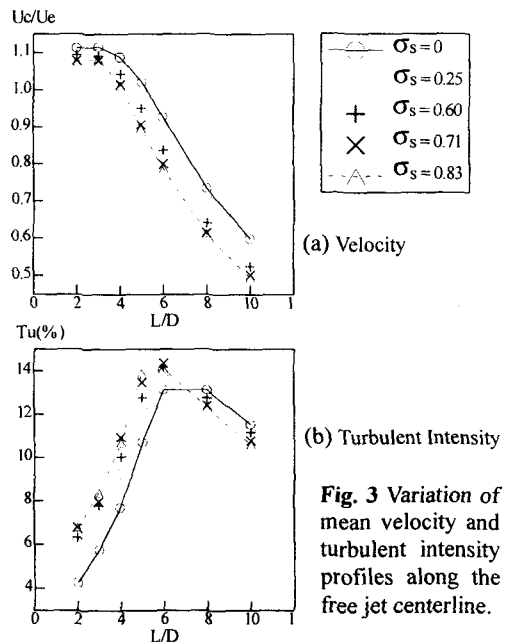


Fig. 3 Variation of mean velocity and turbulent intensity profiles along the free jet centerline.

즈수 $Re=10,000$ 에 맞추어놓고 노즐과 충돌면 사이의 거리를 $L/D = 2, 3, 4, 6, 8, 10$ 으로 변화시켜가면서 실험하였다.

스크린의 설치에 따른 유동구조변화를 관찰하기 위하여 I형 열선 프로브로 제트후류의 평균속도와 난류강도를 측정하였다. Fig. 2는 4가지 스크린 각각에 대해 노즐과 충돌면 사이의 거리비 (L/D)에 따른 평균속도와 난류강도 변화를 나타낸 것으로 스크린이 없는 경우와 비교하였다.

노즐과 충돌면 사이의 거리가 멀어질수록 충돌면을 향하는 제트의 중심 코어(core)영역에서 속도의 차이가 커지고 있다. 충돌분류 연구에서 자유분류(free jet)의 중심선을 따른 유동해석은 분류 충돌후의 유동특성과 깊은 관련을 가지고 있다.

Fig. 3a)는 제트 중심선(centerline)을 따라 측정한 평균속도분포를 나타낸다. 이 그림에서 중심속도(center velocity) U_c 는 노즐 출구속도 U_0 로 무차원하였으며, 가로축은 노즐직경 D 로 무차원화한 노즐 출구로부터의 거리(L/D)를 보여주고 있다. 스크린을 설치하였을 경우 제트중심에서 약 3~17.5%의 속도 감소율을 보여주고 있다. 차폐율이 낮은 스크린보다 높은 스크린의 경우, 코어(core)영역에서의 속도감소율이 높게 나타나는 것은 Baines & Peterson^[1]의 결과와 잘 일치하고 있다.

제트 중심 코어(core)영역에서의 난류강도는 대체로 스크린을 설치하지 않았을 때보다 스크린을 설치하였을 경우에 높게 나타났다. Fig.3b)는 중심축을 따라 측정한 난류강도분포를 나타낸 것이다. $L/D < 6$ 의 근접구조의 포텐셜 코어 영역에서는 차폐율이 높은 스크린일수록 난류강도가 높으며 $L/D=6$ 에서 최대 난류강도 값을 가진다. 하류로 진행할수록 차폐율이 높은 스크린의 난류성분이 빠르게 감소하며 이것은 Laws & Livesey^[2]의 결과와 일치하고 있다.

Fig. 4는 충돌분류의 열전달 특성을 노즐과 충돌면 사이의 거리비(L/D)를 매개변수로 나타내었다. 충돌면에서의 국소 열전달 계수는 Nusselt 수로 표시하였다.

Fig. 4에서 L/D 변화에 따른 충돌면에서의 국소 열전달률은 정체점 부근($R/D > 1$)에서 최대값을 가지며 $R/D=1.5\sim 2$ 부근에서 secondary peak가 나타나고 있다. 이 secondary peak 현상은 층류경계층에서 난류경계층으로 천이(transition)되면서 난류강도 증가와 함께 열전달이 증가하는 현상으로 설명할 수 있다.

$L/D > 6$ 구간을 보면 전반적으로 스크린을 설치함에 따라 충돌면에서의 국소 열전달률이 증가하

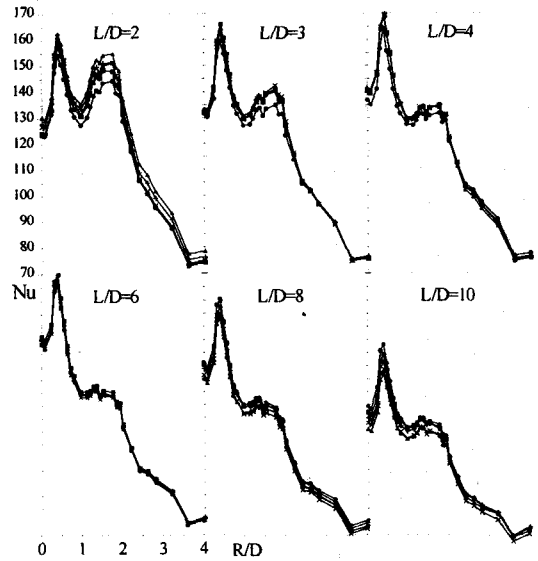


Fig. 4 Variations of Nusselt numbers for fully-developed impinging jet with screens.

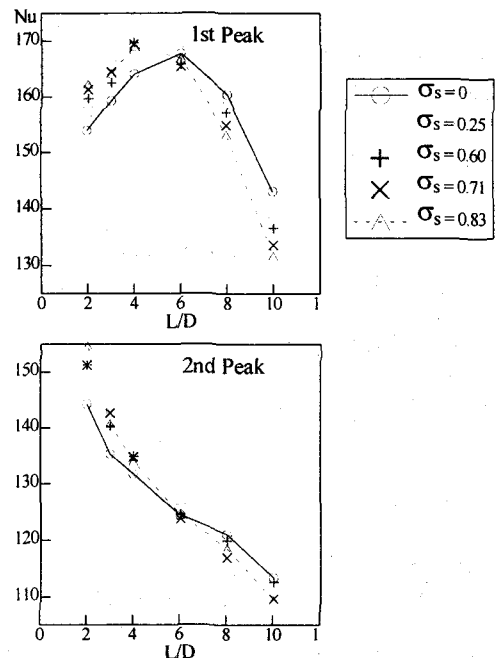


Fig. 5 Variations of Nusselt numbers for the First and Secondary peak in fully-developed impinging jet with screen.

였음을 알 수 있다. 노즐과 충돌면 사이의 거리 $L/D=2, 3$ 에서 first peak와 secondary peak 열전달 상승률은 5.6~6.9%의 증가율을 보여준다. Fig. 3b)를 보면 $L/D=6$ 일 때 난류강도가 가장 높은 값을

가지며, Lee et al^[6]에서 언급한 바와 같이 원형제트의 경우에는 난류강도가 $L/D=6$ 부근에서 최대값을 가지므로 이곳에서 최대 열전달 분포를 보여준다. $L/D=6$ 을 경계로, 스크린의 차폐율에 상관없이 거의 일정한 열전달률을 보여주고 있다. $L/D<6$ 구간에서는 스크린을 설치한 경우가 스크린이 없는 경우와 비교하여 낮은 열전달 계수를 가지는 것을 알 수 있다.

Fig. 5 는 차폐율이 서로 다른 스크린에 대해서 노즐과 충돌면 사이의 거리비(L/D) 변화에 따른 first peak 와 second peak 의 국소 열전달을 나타낸 것이다. 차폐율이 높을수록 $L/D<6$ 지점에서 높은 열전달률을 보이지만, $L/D=6$ 을 경계로 차폐율이 높을수록 열전달률이 급속하게 하강하는 것을 알 수 있다. 자유분류의 유동구조와 종합해 볼 때, 차폐율이 높은 스크린일수록 가까운 거리에서 속도분포는 큰 차이를 보이지 않지만 난류강도가 상대적으로 높은 수치를 보여주고 있다. 이러한 난류강도의 증가는 열전달율을 향상시켜주는 지배적인 요인으로 작용한다. 반면에 노즐과 충돌면 사이의 거리가 멀어질수록 스크린 차폐율 변화에 따른 난류강도의 차이는 점차 사라지고, 운동량 손실에 따른 속도강하가 상대적으로 지배적인 변수로 작용하기 때문에 열전달율이 급격히 떨어진다.

4. 결론

차폐율이 서로 다른 mesh 스크린을 이용한 충돌분류의 유동구조 변화가 충돌면에서의 전열특성에 미치는 효과에 대해 실험적으로 연구하였다. 본 연구의 결과를 정리해 보면 다음과 같다.

- (1) 스크린의 차폐율이 커질수록 제트 중심 속도는 노즐과 충돌면 사이의 거리(L/D)가 멀어질수록 빠르게 감소하며, $L/D<6$ 인 영역에서는 상대적으로 큰 난류강도 차이를 보인다.
- (2) 차폐율이 큰 스크린을 설치하였을 경우, $L/D=2$ 조건에서 열전달률이 약 6.9% 증가하였으며, 거리비(L/D)가 증가할수록 차폐율이 높은 스크린의 열전달률은 오히려 감소한다.
- (3) 차폐율이 큰 스크린은 작은 L/D 조건에서 난류강도 증가로 열전달을 증가시킨다. 반면에, L/D 가 증가할수록 운동량 감소와 속도의 강하로 인하여 스크린이 열전달에 미치는 효과는 떨어진다.

후 기

본 연구는 BK21 사업과 국가지정연구실 과제지원을 통해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] W. D. Baines and E. G. Peterson, An Investigation of Flow Through Screens, ASME, July 1951, pp.467-480.
- [2] W. G. Rose, Interaction of grid turbulence with a uniform mean shear, J. Fluid Mech., Vol. 44 (1970), pp.767-779.
- [3] E. M. Laws and J. L. Livesey, Flow Through Screens, Ann. Rev. Fluid Mech., 1985. 10, pp.247-266.
- [4] Johan Groth and Arne V. Johansson, Turbulence reduction by Screens., J. Fluid Mech., Vol. 197 (1988), pp.139-155.
- [5] Lee, D., Greif, R., Lee, S. J. and Lee, J., 1995, "Heat Transfer from a Flat Plate to a Fully Developed Axisymmetric Impinging Jet," ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 117, pp. 772-776.